ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin,2022;(12-2):102–114
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.355 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_102

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ АККУМУЛЯТОРОВ В СОСТАВЕ ТЯГОВОЙ УСТАНОВКИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

С. И. Дедов[1], **А. А. Штанг**[1], **Е. Ю. Абрамов**[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Представлены результаты испытаний литий-железо-фосфатных (LFP) ячеек, целью которых является получение модели старения тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) в составе привода электрического карьерного самосвала. Рассмотрен тренд модернизации транспортных средств, применяемых в горном деле, с учетом внедрения электрохимических накопителей энергии в состав тяговой установки. Проведен анализ токовых нагрузок, возникающих при работе в карьере. На основе полученных данных сформирована матрица эксперимента, включающая в себя факторы деградации: токи в режимах заряда и разряда, а также частота изменения режима, характеризуемая длительностью времени под тягой. Проведена серия тестов на специализированном стенде, формирующем необходимую форму тока, а также поддерживающем одновременное тестирование до 30 ячеек. Для всех опытов велась запись текущих токов, напряжения и температуры ячейки. По результатам тестирований построены кривые деградации ячеек для различных режимов нагрузки. Выявлено, что наибольшему износу подвержены ячейки, нагруженные большими токами тяги, торможения и длительностью режима тяги, тогда как наименьшему – длительное воздействие малого тока тяги с малым током торможения. Полученные результаты могут быть применены для более точного прогноза степени деградации ТАБ, а также оптимизации алгоритмов системы управления батареей.

Ключевые слова: карьерный самосвал, электротранспорт, литиевый аккумулятор, химический источник тока, литий-железо-фосфат, деградация, рекуперация энергии, полный факторный эксперимент.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта №20-58-53055 – «Исследование влияния форсированных и тяжелых циклических режимов заряда и разряда на физико-химические характеристики функциональных материалов и ресурса литиевых аккумуляторов».

Для цитирования: *Дедов С. И., Штанг А. А., Абрамов Е. Ю.* Исследование деградации аккумуляторов в составе тяговой установки карьерных самосвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 102–114. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_102.

Study of degradation of accumulators as part of the traction plant of quarry dump trucks

S. I. Dedov[1], **A. A. Shtang**[1], **E. Yu. Abramov**[1]

[1] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

© С. И. Дедов, А. А. Штанг, Е. Ю. Абрамов. 2022

Abstract: The paper presents the results of tests of lithium-iron-phosphate (LFP) cells, the purpose of which is to obtain an aging model of a traction battery (TAB) as part of the drive of an electric mining dump truck. The trend of modernization of vehicles used in mining is considered, taking into account the introduction of electrochemical energy storage devices into the traction unit. The analysis of current loads arising during work in a quarry is carried out. Based on the data obtained, an experimental matrix was formed, which includes degradation factors: currents in charge and discharge modes, as well as the frequency of mode changes characterized by the duration of time under traction. A series of tests was carried out on a specialized stand that forms the necessary current form, as well as supports simultaneous testing of up to 30 cells. For all experiments, the current currents, voltage and temperature of the cell were recorded. Based on the test results, cell degradation curves for various load modes are constructed. It is revealed that the cells loaded with high traction currents, braking and the duration of the traction mode are subject to the greatest wear, while the least is the long–term effect of a low traction current with a low braking current. The obtained results can be applied for a more accurate prediction of the degree of degradation of the TAB, as well as optimization of the algorithms of the battery management system.

Key words: dump truck, electric transport, lithium battery, chemical current source, lithium-iron-phosphate, degradation, energy recovery, full factor experiment.

Acknowledgment: The study was carried out with the financial support of the RFBR and the State Research Institute of China within the framework of the scientific project No. 20-58-53055 — «Study of the influence of forced and heavy cyclic charge and discharge modes on the physicochemical characteristics of functional materials and the life of lithium batteries».

For citation: Dedov S. I., Shtang A. A., Abramov E. Yu. Study of degradation of accumulators as part of the traction plant of quarry dump trucks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):102—114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_102.

1. Введение

На современном этапе развития горной транспортной техники прослеживается тренд, направленный на увеличение количества энергоэффективных электротранспортных средств. Многие технологические достижения, применяемые в легковых электромобилях, могут быть использованы в горнодобывающей промышленности для снижения расходов на обслуживание техники и затрат на топливо, а также для минимизации углеродного следа [1, 2]. Так, по прогнозам консалтинговой компании IDTechEx [3], рынок электротранспорта для горнодобывающей промышленности составит $15 млрд в 2028 году.

Одной из приоритетных целей электрификации являются карьерные самосвалы. Основные преимущества перед дизельными самосвалами — возможность рекуперации значительного количества энергии в рекуперативном режиме при торможении на спуске, существенно меньшее число узлов, агрегатов и компонентов, что повышает надежность и ремонтопригодность.

Электрический карьерный самосвал полностью приводится в движение от бортовых аккумуляторов. Он не требует сжигания дизельного топлива и может возвращать часть энергии в накопитель (рекуперативное торможение) с высокой эффективностью и без загрязнения окружающей среды [4].

В традиционном карьерном самосвале с гибридным приводом применяется дизель-генераторная установка и тяговый электродвигатель. Во время движения химическая энергия преобразуется в механическую энергию дизельным двигателем. Затем приводится в действие генератор для выра-

ботки электрической энергии, которая передается на тяговый электродвигатель, реализующий крутящий момент на колесе. При торможении кинетическая энергия автомобиля передается от колеса к двигателю. Электродвигатель действует как генератор, преобразующий энергию торможения в электрическую, а затем она преобразуется в теплоту тормозным резистором [5].

Рекуперативное торможение оказывает значительное влияние на улучшение дальности пробега и экономические характеристики транспортного средства [6]. В работе Wei Zhang и др. [7] получены теоретические значения возможной рекуперируемой энергии, составляющие от 4.76% до 5.73% от всей потребленной энергии. Однако практическое значение может быть выше, если при спуске самосвал также будет загружен.

Новейшие модели электрических самосвалов оборудуются LFP либо литий-никель-марганец-кобальт-оксидными (NMC) аккумуляторами энергоемкостью от 500 кВт·ч [3]. Это в большой степени определяет первоначальную стоимость самосвала и затраты на последующие замены ТАБ по причине старения. Поэтому вопрос об увеличении срока службы аккумулятора является актуальным.

Количество энергии, которое может накапливать литиевая аккумуляторная батарея, уменьшается со сроком службы. Это является результатом различных механических и электрохимических процессов, многие из которых зависят от условий эксплуатации. Чтобы предсказать срок службы батареи и скорость деградации при различных профилях нагрузки, было предложено множество моделей деградации. Их можно условно разделить на три категории.

1. Эмпирические модели, интерполирующие набор данных из крупномасштабного эксперимента с циклической нагрузкой. Они могут быть очень эффективными, но не имеют универсальности, поскольку они действительны только для точного химического состава батареи и условий эксплуатации, проверенных в эксперименте, и могут демонстрировать растущую неточность прогнозов состояния батареи при использовании для экстраполяции на большие расстояния [8—12].

2. Физические модели. Обычно это наборы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих физические процессы, происходящие в батарее. Они полезны для понимания возможных механизмов деградации и могут быть более надежными, чем чисто эмпирические подходы, но часто являются сложными в вычислительном отношении и включают большое количество параметров, часть из которых могут быть неизвестны [10, 13, 14].

3. Модели «машинного обучения». Обычно это подходы «черного ящика», похожие на эмпирический подход, но с большей гибкостью. Они могут быть быстрыми и точными, но для их эффективности требуется большой объем данных, и зачастую трудно интерпретировать и объяснить их результаты [15—17].

Достаточно хорошо исследованы зависимости степени деградации от тока, уровня заряда (SOC) и температуры для различных типов ТАБ. В работе Joris de Hoog [8] и др. получена полуэмпирическая модель старения NMC-аккумулятора. В ней учитывались такие факторы, как температура, глубина разряда, средний уровень заряда и ток. Результаты опытов по циклическому старению показали, что на потерю емкости значительно влияют глубина разряда и темпера-

тура. В исследовании Martin Petit [9] и др. помимо этих факторов для получения модели старения литий-никель-кобальт-алюминий-оксидного и LFP аккумуляторов принят во внимание фактор календарного старения.

Ряд исследований посвящен влиянию рабочего диапазона SOC и формы тока. Так, в работе [18] по результатам испытаний ячеек заряд/разряд током 1С сохранял ресурс в наибольшей степени по сравнению с другими режимами. При этом испытания с частичным использованием емкости в диапазоне от 40 до 20% также показывают наилучший результат по сроку службы.

Также проведен ряд исследований, посвященных выявлению корреляционной зависимости срока службы с длительностью хранения [19], внешним механическим воздействием [20] и др.

Авторами выдвинута гипотеза, что частота изменения направления потока энергии при чередовании режимов тяги и торможения также может влиять на скорость процесса деградации. Учет этого фактора положительно отразится на точности оценки срока службы ТАБ, применяемых как электромобилями, так и техникой для строительства, сельского хозяйства и горной промышленности.

2. Методика исследований

Форма и значения нагрузки ТАБ карьерного самосвала определяется ездовым циклом. На рис. 1 представлен цикл движения во время работы [7], который существенно отличается от режимов движения автотранспортных средств, перемещающихся по дорогам общего пользования [21].

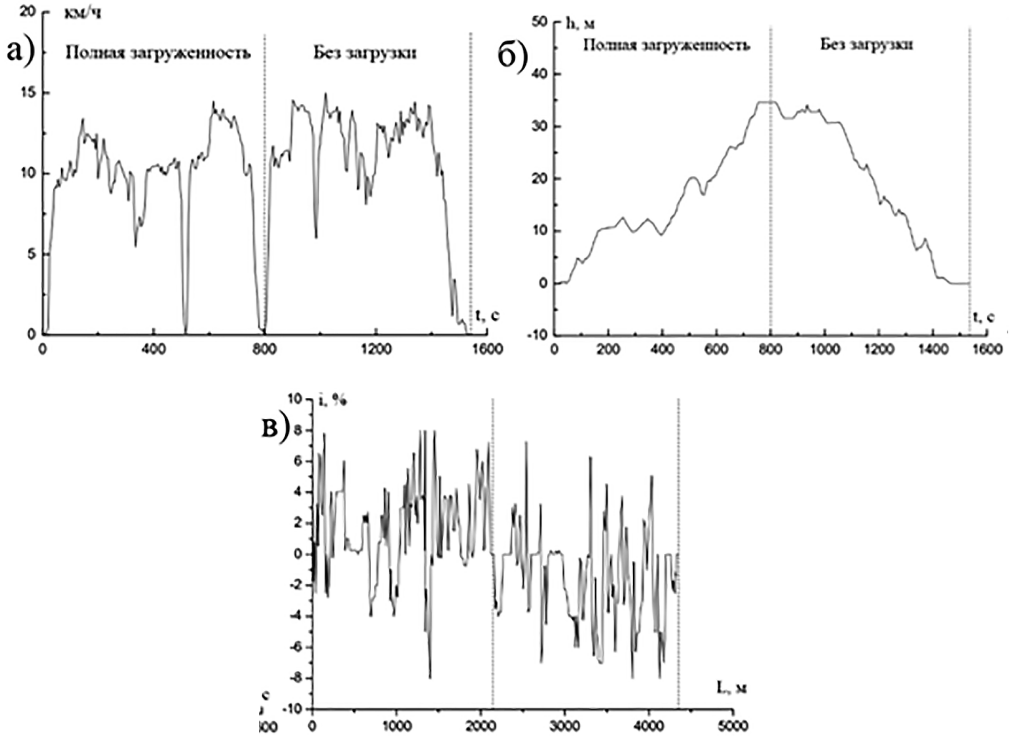

Рис. 1. Ездовой цикл: а — скорость карьерного самосвала; *б* — высота; *в* — уклон
Fig. 1. Driving cycle: a — vehicle speed; *b* — elevation; *c* — slope

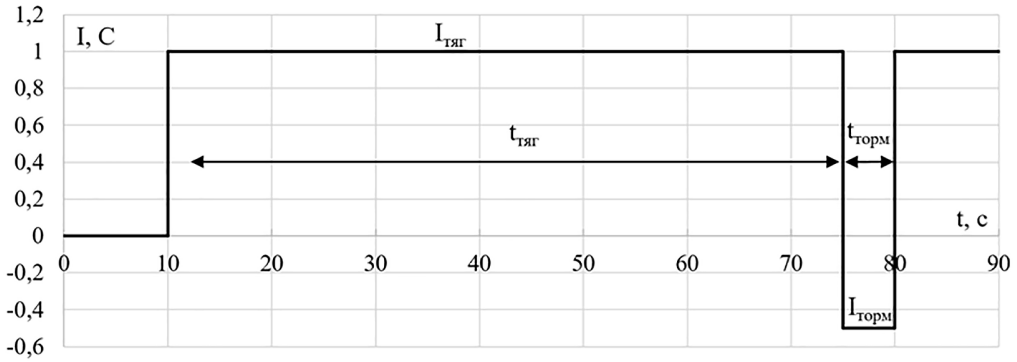

Рис. 2. Фрагмент токовой диаграммы для опыта (1-65/05-5)
Fig. 2. Fragment of the current diagram

Так, при движении в гору карьерный самосвал полностью загружен, и через 799 с он достигает места разгрузки с относительной высотой 34,6 м, средняя скорость 9,64 км/ч, а максимальная скорость 14,48 км/ч, максимальный уклон 8%, пробег 2,14 км. При спуске после разгрузки возврат к месту погрузки занимает 735 с, средняя скорость составляет 10,79 км/ч, максимальная скорость 14,99 км/ч, максимальный уклон 8%, а расстояние проезда 2,21 км.

На основе данных рис. 1 получена токовая нагрузка, возникающая в одиночной ячейке ТАБ самосвала модели Komatsu 605–7 при замене дизельного двигателя на синхронный электродвигатель мощностью 590 кВт и LFP-аккумулятор энергоемкостью 700 кВт·ч.

Для получения модели старения на основе полного факторного эксперимента токовая нагрузка представлена в виде чередующихся режимов тяги и торможения (рис. 2). В качестве исследуемых факторов деградации принята длительность тяги $t_{тяг,}$ а также значения токов в режимах тяги $I_{тяг}$ и торможения $I_{торм}$ относительно номинальной емкости аккумуляторной ячейки $Q_{ячейки}$, определяемых по соотношению

$$I_{отн} = I_{ячейки} / Q_{ячейки}\ ,\ C\ . \qquad (1)$$

Длительность режима торможения $t_{торм}$ принята равной 5 с. Все опыты проводились при комнатной температуре 21–27°С. За уровни факторов приняты величины, соответствующие средним и максимальным значениям тока тяги и рекуперации и времени между переключениями режимов. Принятые в исследовании уровни факторов представлены в табл. 1. Основные характеристики используемой ячейки представлены в табл. 2.

3. Описание разработанного испытательного стенда

Тестирование проводилось на специализированном стенде, разработанном сотрудниками кафедры ЭТК НГТУ (рис. 3).

Алгоритм реализует один из двух режимов управления: калибровку или моделирование работы накопителя электромобиля. Каждые 50 циклов заряда разряда от $U_{макс}$ до $U_{мин}$ проводится измерительный цикл с полным разрядом-зарядом ячеек током 500 мА. Подробное описание стенда представлено в [22].

На рис. 4 представлены передаточные характеристики тока (зависимость регистрируемых значений $I_{рег}$ от уста-

Таблица 1
Принятые уровни факторов эксперимента
Accepted levels of experimental factors

Факторы	Уровни факторов	
	Верхний +1	Нижний –1
$I_{тяг}$, С	3	1
$I_{торм}$, С	3	0,5
$t_{тяг}$, с	65	20

Таблица 2
Характеристики исследуемой LFP-ячейки
Studied LFP cell characteristics

Параметр		Размерность	Величина
Форм-фактор		–	18650
Емкость		мА·ч	1600
Напряжение	Минимальное	В	2,5
	Номинальное		3,2
	Максимальное		3,65
Ток заряда максимальный		А	1,6 (1С)
Ток разряда максимальный		А	4,8 (3С)
Температура эксплуатации		℃	–20÷60

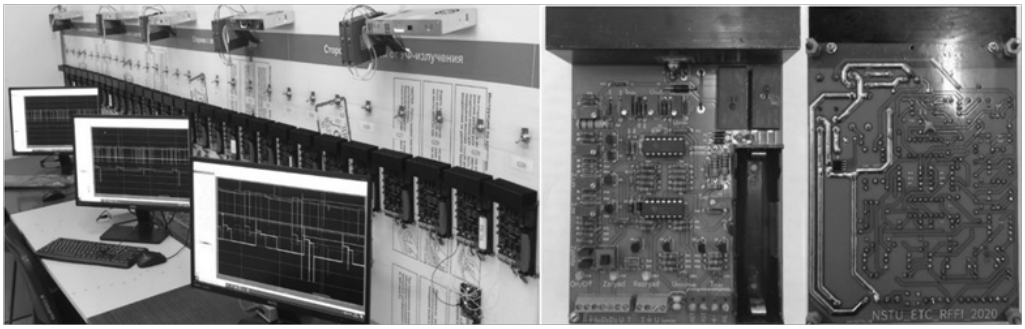

Рис. 3. Испытательный стенд и тестовая плата [22]
Fig. 3. Laboratory facility and test board [22]

навливаемых микроконтроллером $I_{уст}$) для всех 30 каналов стенда. Снятие этих характеристик выполнялось измерительными приборами с точностью ±0.05%+5. Как видно из рис. 4, в области используемых для тестов значений токов погрешность не превышает 5%. При проверке значений регистрируемого напряжения установлено, что погрешность измерений не превышает ±0.8%.

4. Результаты

Полученные результаты измерений остаточной емкости аккумуляторных ячеек после циклирования представлены на рис. 5. Всего протестировано

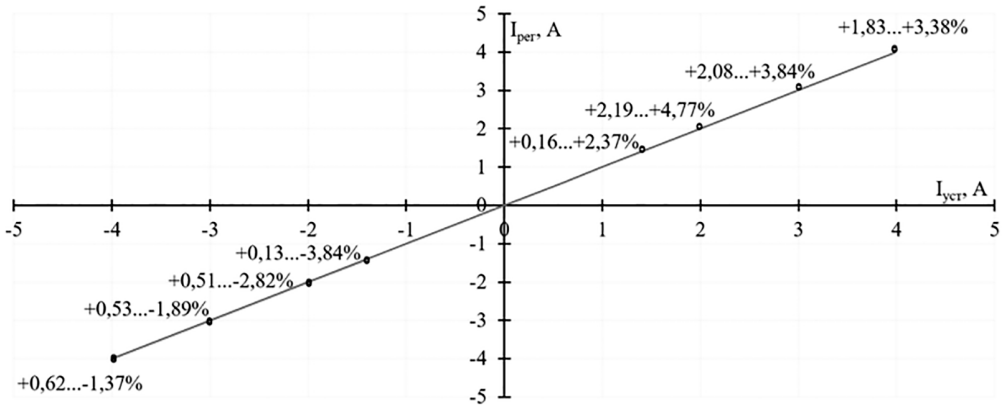

Рис. 4. Оценка погрешности по току 30 каналов исследовательского стенда
Fig. 4. Current error estimation of 30 channels of laboratory facility

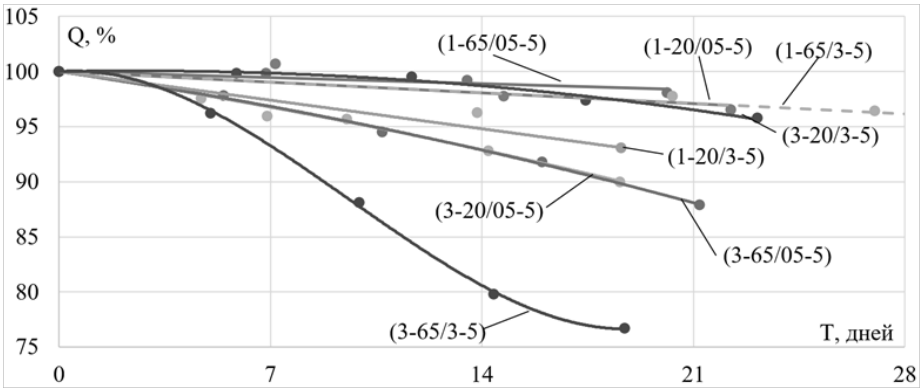

Рис. 5. Зависимость остаточной емкости аккумулятора от времени циклирования
Fig.5. Dependence of the residual battery capacity on the cycle time

24 ячейки, длительность опытов варьируется от 17 до 27 дней. Кривые можно разбить на три категории:

1) незначительная степень деградации (менее 5% за 2 недели) — к ним относятся опыты (1–65/05–5), (3–20/3–5), (1–65/3–5), (1–20/05–5);

2) средняя степень деградации (5–15%) — опыты (1–20/3–5), (3–65/05–5), (3–20/05–5);

3) высокая степень (>15%) — опыт (3–65/3–5).

Все ячейки с током тяги 1С вне зависимости от длительности и тока торможения показали малую степень деградации (менее 5%) после двух недель тестирования, тогда как при токе тяги 3С — лишь одна ячейка (3–20/3–5).

Увеличение длительности тяги до 65 с значительно уменьшает остаточную емкость (ΔQ=20%) при токах тяги и торможения 3С. В случае с током торможения 0,5С данная корреляция не наблюдается — в течение двух недель опыты показывали сравнительно равный результат.

Для токов тяги 1С при различных значениях токов торможения корреляция обратная — увеличение длительности тяги при токе рекуперации 0,5С уменьшает потерю емкости на величину менее 1%, а при 3С — на 5% за 17 дней.

Таблица 3
Матрица планирования и результаты опытов
Planning matrix and test results

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	Q, %
1	+	+	+	+	–	81
2	+	–	+	+	–	98,8
3	+	+	–	+	–	93
4	+	–	–	+	–	98,5
5	+	+	+	–	–	97
6	+	–	+	–	–	95
7	+	+	–	–	–	93
8	+	–	–	–	–	99,7
Коэффициенты	97,25	–1,75	-0,775	–0,8375	–2,75	

5. Обсуждение результатов

Полученные данные по циклированию LFP-ячеек согласуются с уже существующими исследованиями, направленными на установление корреляции степени деградации ячейки и тока. Это подтверждается тем, что все опыты с током тяги 1С за 17 дней демонстрируют степень деградации не более 7%, тогда как большинство опытов с током тяги 3С — более 12%.

По полученным результатам проведения серии опытов получены коэффициенты уравнения регрессии. Для описания связи характеристики старения *Q(z)* с факторами, указанными в табл. 1 с учетом времени тестирования, принята модель в виде полинома:

$$Q = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \\ + b_5x_1x_2 + b_6x_1x_3 + b_7x_1x_4 + b_8x_2x_3 + \\ + b_9x_2x_4 + b_{10}x_3x_4 + b_{11}x_1x_2x_3 + b_{12}x_1x_2x_4 + \\ b_{13}x_1x_3x_4 + b_{14}x_2x_3x_4 + b_{15}x_1x_2x_3x_4 \quad (2)$$

где b_0, b_1, b_2 и т.д. — коэффициенты полинома; x_1, x_2, x_3, x_4 — кодированное значение тока тяги, тока торможения, длительности режима тяги и общее время работы ячейки соответственно.

Матрица планирования эксперимента и результаты опытов представлены в табл. 3. Опыты проводились одновременно.

Коэффициенты b_i вычислялись по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} x_{ij} y_i}{N}, \quad (3)$$

где x_{ij} — кодированное значение i-го фактора в j-м опыте.

Вычисленные значения коэффициентов указаны в табл. 3. После подстановки в уравнение (1) значений коэффициентов b_i оно получило следующий вид:

$$Q = 97,25 - 1,75x_1 - 0,775x_2 - \\ -0,833x_3 - 2,775x_4 - 0,225x_1x_2 - \\ -1,16x_1x_3 - 1,75x_1x_4 - 0,838x_2x_3 - \\ -0,775x_2x_4 - 0,838x_3x_4 - 1,313x_1x_2x_3 - \\ -0,225x_1x_2x_4 - 1,163x_1x_3x_4 - 0,688x_2x_3x_4 - \\ -1,313x_1x_2x_3x_4 \quad (4)$$

Для проверки гипотезы адекватности уравнения (4) определена дисперсия адекватности при прогнозируемой

длительности тестирования 7 дней по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{S_R}{f}. \qquad (5)$$

Остаточная сумма квадратов определена по выражению

$$S_R = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \overline{y})^2 = 6{,}84. \qquad (6)$$

Дисперсия адекватности составила

$$S_{ад}^2 = \frac{S_R}{f} = 0{,}622, \qquad (7)$$

где $f = N - (k+1) = 11$; k — число исследуемых факторов.

Табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 11 и знаменателя 16 равно F_T = 2,42. Так как $F_P < F_T$, представленную модель можно признать адекватной.

Результаты опытов и математического моделирования подтверждают гипотезу о наличии корреляции между уменьшением емкости ячейки и частотой переключений режимов. Причем для различных комбинаций токов тяги и торможения вид корреляции различается. Это может обуславливаться значительным влиянием значений токов тяги и рекуперации.

Карьерная техника эксплуатируется при существенных нагрузках. В совокупности с массогабаритными показателями и малой удельной энергоемкостью применяемых аккумуляторов это влечет за собой большие значения тока в ячейке и, как следствие, более быструю деградацию по сравнению с электромобилями, электробусами и т.д.

6. Заключение

Проведена серия опытов по циклированию LFP-ячеек на специализированном стенде. Результаты опытов подтверждают наличие корреляции между уменьшением емкости ячейки и частотой переключений режимов работы. Также проведенное исследование согласуется с существующими моделями деградации литиевых ячеек аккумуляторных батарей карьерных электрических самосвалов Komatsu.

При токах тяги 1С наблюдается положительная корреляция — увеличение длительности тяги с 20 до 65 с уменьшает степень деградации за 2 недели опытов на величину от 1 до 5% в зависимости от тока торможения. При токах тяги 3С –отрицательная корреляция с величиной деградации до 20%, что может обуславливаться большим влиянием значений токов тяги и рекуперации по сравнению с частотой переключений.

Получено регрессионное уравнение старения LFP-ячейки в зависимости от величин тока заряда и разряда, длительности разряда и общего времени работы, что позволяет прогнозировать ресурс аккумуляторных батарей карьерных электрических самосвалов.

Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение модели деградации LFP-ячеек в режимах с меньшими значениями токов заряда-разряда с целью подтверждения гипотезы о том, что в данном режиме работы частота переключений может быть более значимым фактором при определении остаточной деградации аккумуляторных батарей карьерных электрических самосвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степаненко В. П.* К вопросу повышения ресурсосбережения на автономных электростанциях в Республике Саха (Якутия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 62–68. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0–62–68.

2. *Беклемишев А. М.* Исследования влияния потерь мощности в трехфазных асинхронных электродвигателях на затраты электроэнергии при сооружении геологоразведочных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № S53. — С. 20–30. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-53-20-30.

3. *Dubaniewicz T. H.*, *Zlochower I.*, *Barone T.*, *Thomas R.*, *Yuan L.* Thermal Runaway Pressures of Iron Phosphate Lithium-Ion Cells as a Function of Free Space Within Sealed Enclosures // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, no. 38(1), pp. 539–547. DOI: 10.1007/s42461-020-00349-9.

4. *Shurov N. I.*, *Dedov S. I.*, *Shtang A. A.* Determination of the combined power source parameters in a hybrid small class share taxi based on modelling energy consumption process // Journal of Physics: Conference Series. 2020, vol. 1661, p. 8. DOI: 10.1088/1742−6596/1661/1/012193.

5. *Feng Y.*, *Dong Z.*, *Yang J.*, Cheng, R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks // 2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA). 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/mesa.2016.7587102.

6. *Zhou M.*, *Gao Z.*, *Zhang H.* Research on regenerative braking control strategy of hybrid electric vehicle // Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology. 2011. DOI: 10.1109/ifost.2011.6021027.

7. *Zhang W.*, *Yang J.*, *Zhang W.*, & *Ma F.* Research on Regenerative Braking of Pure Electric Mining Dump Truck // World Electric Vehicle Journal. 2019, vol. 10, no. 2, p. 39. DOI: 10.3390/wevj10020039.

8. De Hoog, J., Timmermans, J.-M., Ioan-*Stroe D.*, *Swierczynski M.*, *Jaguemont J.*, *Goutam S.*, Van Den *Bossche P.* Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation // Applied Energy. 2017, vol. 200, pp. 47–61. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.018.

9. *Petit M.*, *Prada E.*, Sauvant-*Moynot V.* Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime // Applied Energy. 2016, vol. 172, pp. 398–407. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.119.

10. *Schimpe M.*, von *Kuepach M. E.*, *Naumann M.*, *Hesse H. C.*, *Smith K.*, *Jossen A.* Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries // Journal of The Electrochemical Society. 2018, vol. 165, no. 2, pp. A181–A193. DOI: 10.1149/2.1181714jes.

11. *Reniers J. M.*, *Mulder G.*, Ober-*Blöbaum S.*, *Howey D. A.* Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling // Journal of Power Sources. 2018, vol. 379, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.004.

12. *Smith K.*, *Saxon A.*, *Keyser M.*, *Lundstrom B.*, *Ziwei C.*, Roc, A. Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system // 2017 American Control Conference (ACC). 2017. DOI: 10.23919/acc.2017.7963578.

13. *Barré A.*, *Deguilhem B.*, *Grolleau S.*, *Gérard M.*, *Suard F.*, *Riu D.* A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications // Journal of Power Sources. 2013, vol. 241, pp. 680–689. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.

14. *Su C.*, *Chen H. J.* A review on prognostics approaches for remaining useful life of lithium-ion battery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 93,012040. DOI: https://doi.org/10.1088/1755−1315/93/1/012040.

15. *Goebel K.*, *Saha B.*, *Saxena A.*, *Celaya J.*, *Christophersen J.* Prognostics in Battery Health Management // IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2008, vol. 11, no. 4, pp. 33–40. DOI: https://doi.org/10.1109/mim.2008.4579269.

16. *Hussein A. A.* Capacity Fade Estimation in Electric Vehicle Li-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2321–2330. DOI: https://doi.org/10.1109/tia.2014.2365152.

17. *Nuhic A.*, *Terzimehic T.*, Soczka-*Guth T.*, *Buchholz M.*, *Dietmayer K.*, Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data driven methods // Journal of Power Sources. 2013, no. 239, pp. 680–688. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.

18. *Zhang J.*, & *Lee J.* A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery // Journal of Power Sources. 2011, no. 196(15), 6007–14. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.101.

19. *Spotnitz R.* Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. 2003, vol. 113, no. 1, pp. 72–80. DOI: 10.1016/s0378–7753(02)00490–1.

20. *Zhou W.* Effects of external mechanical loading on stress generation during lithiation in Li-ion battery electrodes // Electrochimica Acta. 2015, vol. 185, pp. 28–33. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.10.097.

21. *Щуров Н. И.*, *Штанг А. А.*, *Дедов С. И.*, *Сяоган У.* Анализ влияния режимов движения электромобилей на процесс старения тяговых аккумуляторов на основе цикла WLTC // Журнал СФУ. Техника и технологии. — 2020. — С. 977–990. DOI: https://doi.org/10.17516/1999–494x-0279.

22. *Abramov E. Y.*, *Dedov S. I.* Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 2032, no. 1,012092. DOI: 10.1088/1742–6596/2032/1/012092. ГИАБ

REFERENCES

1. Stepanenko V. P. K Resource-saving promotion at isolated generating plants in the Republic of Sakha (Yakutia). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. No. 6, pp. 62–68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0–62–68.

2. Beklemishev A. M. Studies of the impact of power losses in threephase asynchronous motors on the cost of electricity in the construction of exploration wells. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. S53, pp. 20–30. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-53-20-30.

3. Dubaniewicz T. H., Zlochower I., Barone T., Thomas R., Yuan L. Thermal Runaway Pressures of Iron Phosphate Lithium-Ion Cells as a Function of Free Space Within Sealed Enclosures. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, no. 38(1), pp. 539–547. DOI: 10.1007/s42461-020-00349-9.

4. Shurov N. I., Dedov S. I., Shtang A. A. Determination of the combined power source parameters in a hybrid small class share taxi based on modelling energy consumption process. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020, vol. 1661, p. 8. DOI: 10.1088/1742–6596/1661/1/012193.

5. Feng Y., Dong Z., Yang J., Cheng, R. Performance modeling and cost-benefit analysis of hybrid electric mining trucks. *2016 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*. 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/mesa.2016.7587102.

6. Zhou M., Gao Z., Zhang H. Research on regenerative braking control strategy of hybrid electric vehicle. *Proceedings of 2011 6th International Forum on Strategic Technology*. 2011. DOI: 10.1109/ifost.2011.6021027.

7. Zhang W., Yang J., Zhang W., & Ma F. Research on Regenerative Braking of Pure Electric Mining Dump Truck. *World Electric Vehicle Journal*. 2019, vol. 10, no. 2, p. 39. DOI: 10.3390/wevj10020039.

8. De Hoog, J., Timmermans, J.-M., Ioan-Stroe D., Swierczynski M., Jaguemont J., Goutam S., Van Den Bossche P. Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a Nickel-Manganese-Cobalt Oxide Cell with real-life profile validation. *Applied Energy*. 2017, vol. 200, pp. 47–61. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.05.018.

9. Petit M., Prada E., Sauvant-Moynot V. Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime. *Applied Energy*. 2016, vol. 172, pp. 398–407. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.119.

10. Schimpe M., von Kuepach M. E., Naumann M., Hesse H. C., Smith K., Jossen A. Comprehensive Modeling of Temperature-Dependent Degradation Mechanisms in Lithium Iron Phosphate Batteries. *Journal of the Electrochemical Society*. 2018, vol. 165, no. 2, pp. A181–A193. DOI: 10.1149/2.1181714jes.

11. Reniers J. M., Mulder G., Ober-Blöbaum S., Howey D. A. Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modeling. *Journal of Power Sources*. 2018, vol. 379, pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.01.004.

12. Smith K., Saxon A., Keyser M., Lundstrom B., Ziwei C., Roc, A. Life prediction model for grid-connected Li-ion battery energy storage system. *2017 American Control Conference (ACC)*. 2017. DOI: 10.23919/acc.2017.7963578.

13. Barré A., Deguilhem B., Grolleau S., Gérard M., Suard F., Riu D. A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications. *Journal of Power Sources*. 2013, vol. 241, pp. 680–689. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.

14. Su C., Chen H. J. A review on prognostics approaches for remaining useful life of lithium-ion battery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 93,012040. DOI: https://doi.org/10.1088/1755–1315/93/1/012040.

15. Goebel K., Saha B., Saxena A., Celaya J., Christophersen J. Prognostics in Battery Health Management. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. 2008, vol. 11, no. 4, pp. 33–40. DOI: https://doi.org/10.1109/mim.2008.4579269.

16. Hussein A. A. Capacity Fade Estimation in Electric Vehicle Li-Ion Batteries Using Artificial Neural Networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 2321–2330. DOI: https://doi.org/10.1109/tia.2014.2365152.

17. Nuhic A., Terzimehic T., Soczka-Guth T., Buchholz M., Dietmayer K., Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data driven methods. *Journal of Power Sources*. 2013, no. 239, pp. 680–688. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.

18. Zhang J., & Lee J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery. *Journal of Power Sources*. 2011, no. 196(15), 6007–14. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2011.03.101.

19. Spotnitz R. Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*. 2003, vol. 113, no. 1, pp. 72–80. DOI: 10.1016/s0378–7753(02)00490–1.

20. Zhou W. Effects of external mechanical loading on stress generation during lithiation in Li-ion battery electrodes. *Electrochimica Acta*. 2015, vol. 185, pp. 28–33. DOI: 10.1016/j.electacta.2015.10.097.

21. Schurov N. I., Shtang A. A., Dedov S. I., Xiaogang W. Analiz vlijanija rezhimov dvizhenija jelektromobilej na process starenija tjagovyh akkumuljatorov na osnove cikla WLTC. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2020, pp. 977–990. [In Russ]. DOI: https://doi.org/10.17516/1999–494x-0279.

22. Abramov E. Y., Dedov S. I. Laboratory facility development for studying the heavy charge and discharge modes effect on the degradation of lithium-ion batteries. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2032, no. 1,012092. — DOI: 10.1088/1742–6596/2032/1/012092.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дедов Сергей Игоревич[1] — ассистент,
e-mail: dedov@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;
Штанг Александр Александрович[1] — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: shtang@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;
Абрамов Евгений Юрьевич — ассистент,
e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;
[1] Новосибирский государственный технический университет.
Для контактов: *Дедов С. И.*, e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

DedovS. I.[1]*, assistant,*
e-mail: dedov@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4750-3927;
Shtang A. A.[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: shtang@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9772-1784;
Abramov E. Yu.[1], assistant,
e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;
[1] Novosibirsk State Technical University,630073, Novosibirsk, Russia.
Corresponding author: *Dedov S. I.*, e-mail: dedov@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.